

PERANCANGAN SENSOR *FLUXGATE* SEDERHANA SEBAGAI MAGNETOMETER

Roby Tristianoro, Endah Rahmawati, Abd. Kholiq

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya

Email: robystrianoro@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Sensor *fluxgate* adalah sensor yang mampu mengukur medan magnet B dengan cara membangkitkan medan referensi sebagai pembanding dengan medan magnet luar. Penelitian ini telah berhasil merancang sensor *fluxgate* magnetometer sederhana beserta rangkaian pengolah sinyal sensor *fluxgate*. Penelitian skripsi ini bertujuan untuk mendeskripsikan dan mengetahui hasil uji dan karakteristik sensor medan magnet *fluxgate* sebagai magnetometer. Pada penelitian ini digunakan inti sensor yang berupa toroid (yang terbuat dari) inti ferit yang berbentuk lingkaran/*ring* yang dililiti kawat tembaga, lilitan kawat tembaga sebagai kumparan *pick-up*, rangkaian penguat op-amp diferensiator, dan rangkaian detektor fasa. Sebelum dilakukan pengujian sensor, dilakukan pengambilan data referensi dengan menggunakan *Magnetic Field Sensor Pasco CI-6520A* untuk mengetahui nilai medan magnet untuk setiap jarak pengukuran sumber bahan magnetik. Keluaran dari kumparan *pick-up* sensor *fluxgate* berupa sinyal sinusoidal AC yang menunjukkan perubahan medan magnet luar melalui perubahan fasa yang terbaca, kemudian sinyal keluaran sensor akan melalui penguat diferensiator untuk dikuatkan dan akan melalui detektor fasa untuk merubah respon pergeseran fasa menjadi keluaran yang berupa nilai tegangan DC. Pada pengambilan data dilakukan pendekatan persamaan polinomial orde dua untuk mengetahui nilai kesalahan sensor. Pada penelitian ini memiliki nilai kesalahan relatif terbesar 3,180%.

Kata Kunci : magnetometer, pengolah sinyal, sensor *fluxgate*.

Abstract

Fluxgate sensor is a sensor that can measure magnetic field B by generate reference field as comparison to compare with external magnetic field. This research has successfully designed a simple fluxgate magnetometer sensor and fluxgate sensor signal conditioning circuit. This thesis research aims to describe and determine the test results and characteristics of the fluxgate magnetic field sensor as a magnetometer. In this study, the sensor core type is ring core that used toroid ferrite cores as sensor core that winding by copper wire, copper wire winding as a pick-up coil, a differential op-amp amplifier circuit, and a phase detector circuit. Before testing the sensor, reference data was taken using Magnetic Field Sensor Pasco CI-6520A to determine the value of the magnetic field for each distance measuring the source of the magnetic material. The output of pick-up coil of fluxgate sensor is a sinusoidal AC signal that shows changes of external magnetic field through a phase change, then the sensor output signal connected to differentiator amplifier to be amplified and then connected to phase detectors to change the phase shift response into DC voltage value output. A second order polynomial equation approach is used to determine the sensor error value. In this study, the largest relative error value is 3,180%.

Keywords: magnetometer, signal processing, fluxgate sensor.

PENDAHULUAN

Pada pengukuran medan magnet, metode pengukuran medan magnet dibagi secara luas menjadi dua metode yaitu metode induksi dan metode perubahan sifat material. Metode induksi mencakup beberapa metode yaitu metode *stationary-coil*, metode *moving-coil*, metode *rotating-coil*, *vibrating-sample magnetometer (VSM)*, dan *fluxgate magnetometer*. Sedangkan, metode perubahan sifat material mencakup beberapa metode yaitu *hall effect magnetometers*, *magnetoresistive*, *magnetostictive devices*, metode *magneto-optic*, *thin-film magnetometers*, dan metode *magnetic resonance*. Selain metode induksi

dan metode perubahan sifat material terdapat metode lain yaitu *torque magnetometers*, *susceptibility balances*, dan SQUID (Jiles, 1991). Metode *magnetoresistive* dan *fluxgate magnetometers* mampu mengukur medan magnet dengan rentang nilai 10^{-10} - 10^{-3} tesla (Djamal, 2006; Suyatno, 2008). Untuk mengukur medan magnet yang memiliki nilai diatas satu tesla yaitu metode fluxmeter dan efek hall.

Dalam penelitian ini, dilakukan pengukuran medan magnet dengan *fluxgate magnetometers* yang termasuk kategori metode induksi. Metode induksi merupakan metode yang paling sederhana untuk mengukur medan magnet sepanjang lintasan hanya

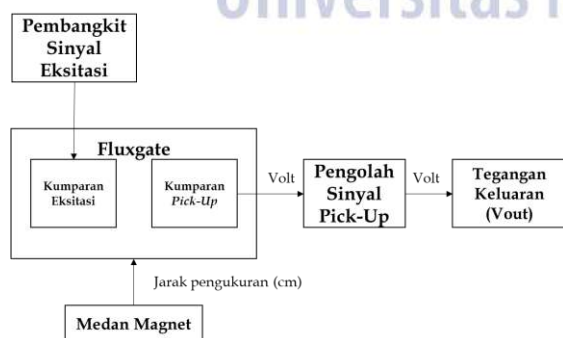
dengan disertai perubahan fluks didalamnya (Jiles, 1991). Metode induksi ini mengacu pada Hukum Faraday yang menyatakan bahwa jika suatu kawat penghantar digerakkan memotong arah suatu medan magnet maka akan timbul suatu gaya gerak listrik (GGL) pada kawat penghantar tersebut. Gaya ini disebut GGL induksi. GGL induksi ini dipengaruhi oleh perubahan fluks dan besarnya bergantung pada jenis inti kumparan dan jumlah lilitan dari kumparan yang digunakan. Semakin besar jumlah kumparan, maka GGL induksi yang dihasilkan juga semakin besar. Hal ini merupakan kelebihan dari metode induksi yang merupakan metode yang sederhana.

Berdasarkan uraian latar belakang, judul penelitian yang akan dilakukan oleh peneliti adalah **“Perancangan Sensor Fluxgate Sederhana Sebagai Magnetometer”**.

METODE

Penelitian ini merupakan jenis penelitian laboratorium tentang perancangan alat ukur medan magnet dengan menggunakan sensor *fluxgate*. Pengukuran kuat medan magnet pada sensor *fluxgate* didasarkan pada hubungan antara kuat medan magnet H yang diberikan dengan fluks medan magnet induksi B . Tegangan keluarannya sebanding dengan arah medan magnet luar yang mempengaruhi inti dan arahnya sebanding dengan arah medan magnet luar tersebut (Djamal *et al.*, 2007).

Sensor *fluxgate* yang terdiri dari dua kumparan, yaitu kumparan eksitasi dan kumparan *pick-up*. Untuk membangkitkan medan magnet referensi digunakan kumparan eksitasi yang dialiri arus bolak-balik oleh rangkaian pembangkit sinyal eksitasi. Hasil keluaran dari sensor *fluxgate* berupa tegangan yang akan diolah dan dikuatkan oleh rangkaian pengolah sinyal *pick-up* dan rangkaian pendukung.



Gambar 1. Alir kerja sensor *fluxgate*

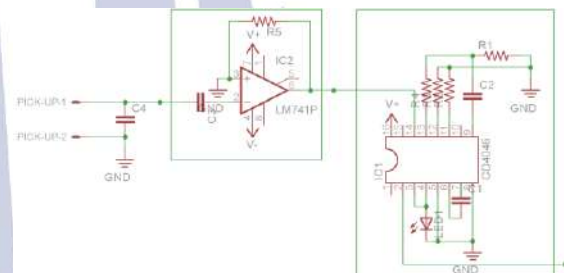
Medan magnet akan diukur oleh sensor *fluxgate* dengan jarak tertentu. Pengukuran medan

magnet akan dilakukan dengan variasi jumlah lilitan kumparan *pick-up*, dan jarak pengukuran. Hasil pengukuran berupa tegangan, tegangan keluaran pada kumparan sekunder akan melalui pengkondisi sinyal yaitu rangkaian penguat diferensiator dan rangkaian detektor fasa. Selanjutnya, dihitung selisih antara nilai tegangan keluaran saat diberi medan magnet dan tanpa diberi medan magnet.

Data yang terbaca akan dianalisis dalam bentuk grafik untuk mengetahui kerja sensor dengan mencari karakteristiknya. Selain itu, Analisa dalam bentuk grafik akan menunjukkan hubungan sensitivitas sensor dengan jumlah lilitan kumparan *pick-up*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

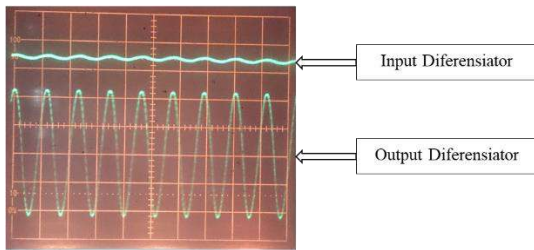
Hasil skematik analog rangkaian pengolah sinyal *pick-up* dapat dilihat pada gambar.



Gambar 2. Rangkaian pengolah sinyal *pick-up*

Sinyal masukan pada sensor *fluxgate* berupa gelombang persegi dengan frekuensi 1,6 kHz yang dihasilkan dari AFG PI-9587C oleh Pasco Scientific yang kemudian dihubungkan pada kumparan eksitasi sensor.

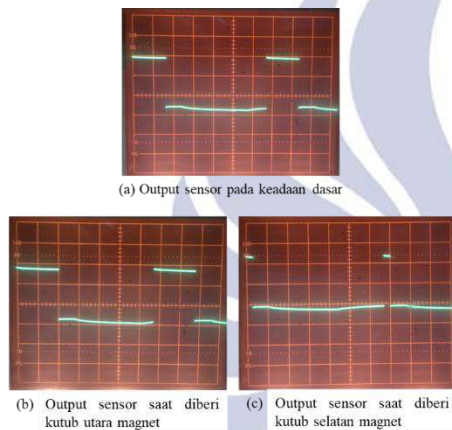
Sinyal keluaran dari kumparan *pick-up* dilewatkan melalui rangkaian op-amp UA741 sebagai penguat diferensiator. Sinyal yang melalui penguat diferensiator op-amp mengalami perbesaran amplitudo sebagai bukti penguatan dari penguat diferensiator op-amp dan tampak pula bentuk sinyal keluaran yang dihasilkan berupa sinyal sinusoidal dengan frekuensi 1,6 kHz yang berarti sinyal tersebut merupakan sinyal dari tegangan listrik AC. Hasil ini sesuai dengan harapan, dimana pada penguat diferensiator rangkaian berfungsi sebagai penguat tegangan dan kapasitor yang dirangkai pada penguat diferensiator dapat menghambat tegangan listrik DC yang masuk ke rangkaian sehingga tidak mempengaruhi keluaran dari sensor.



Gambar 3. Respon penguat diferensiator

Pada gambar 3 terlihat bahwa perubahan tegangan antara sinyal masukan dan sinyal keluaran pada op-amp cukup signifikan.

Sinyal yang dihasilkan oleh rangkaian diferensiator dihubungkan ke rangkaian detektor fasa dan mengatur frekuensi *voltage control oscillator* (VCO) sebesar 3,2 kHz untuk meloloskan sinyal dengan harmonisasi kedua ($2\omega_0$).

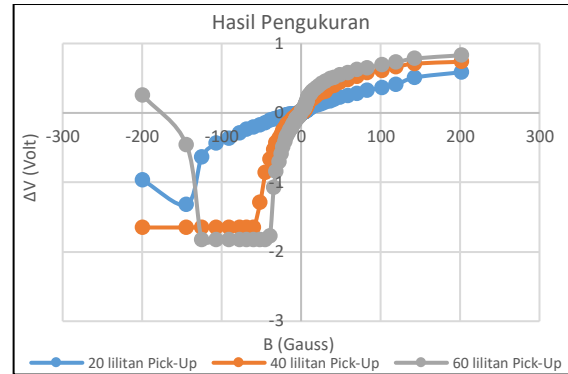


Gambar 4. Respon detektor fasa

Pada gambar 4 terlihat respon pergeseran fasa gelombang pada keluaran dari rangkaian detektor fasa. Dimana pada saat kutub utara magnet didekatkan ke sensor, maka keluaran rangkaian detektor fasa akan semakin membesar. Begitupun sebaliknya, ketika kutub selatan magnet didekatkan ke sensor, maka keluaran rangkaian detektor fasa akan semakin mengecil.

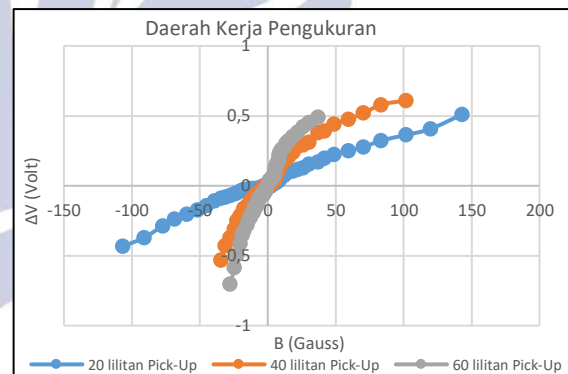
Karakteristik Sensor Fluxgate

Karakterisasi sensor perlu dilakukan untuk mengetahui karakteristik sensor *fluxgate* yang meliputi daerah kerja sensor dan pengaruh penambahan jumlah lilitan kumparan *pick-up*.



Gambar 5. Hasil pengukuran

Pada gambar 5 terlihat karakteristik dari sensor *fluxgate* bahwa nilai medan magnet B berbanding lurus dengan nilai perubahan tegangan keluaran sensor ΔV pada daerah pengukuran tertentu. Pada penelitian ini digunakan data yang memiliki medan magnet diatas 1gauss dikarenakan pada saat pengukuran medan magnet dibawah 1gauss akan dimungkinkan adanya pengaruh medan magnet bumi yang cukup besar. Untuk menandai daerah kerja sensor dilakukan pemilahan data sehingga diperoleh grafik seperti pada gambar 4.7.



Gambar 6. Daerah kerja konfigurasi sensor *fluxgate*

Pada gambar 6 terlihat pengukuran medan magnet positif $B+$ dan medan magnet negatif $B-$ memiliki perbedaan rentang pengukuran pada daerah kerjanya. Daerah kerja maksimum dan minimum sensor ditunjukkan pada tabel 1 dengan konfigurasi, kumparan eksitasi : kumparan *pick-up*.

Tabel 1. Daerah kerja konfigurasi sensor *fluxgate*

No. Sampel	Konfigurasi lilitan	B_{\min} (G)	B_{\max} (G)
1	40:20	-105	140
2	40:40	-30	100
3	40:60	-25	35

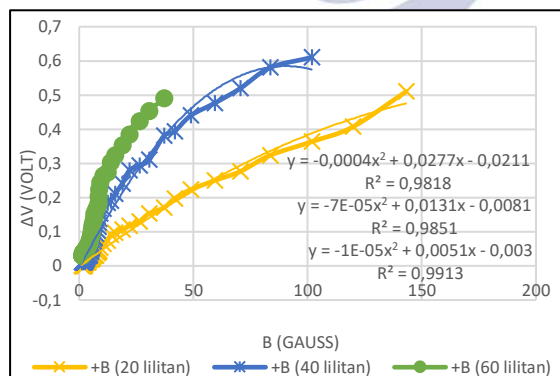
Dapat dilihat pada tabel 1 bahwa daerah maksimum dan minimum pada setiap konfigurasi sensor berbeda-beda dan cenderung semakin mengecil untuk setiap jumlah lilitan kumparan *pick-*

up yang lebih banyak. Hal ini dikarenakan pada setiap jumlah lilitan kumparan *pick-up* yang lebih banyak akan menghasilkan tegangan yang lebih besar layaknya prinsip pada transformator. Sehingga bertambahnya tegangan keluaran dari kumparan *pick-up* akan mempengaruhi keluaran dari rangkaian diferensiator dan rangkaian detektor fasa yang mengakibatkan tegangan sensor pada saat keadaan dasar bertambah untuk setiap jumlah lilitan kumparan *pick-up* yang lebih banyak. Tegangan keluaran awal sensor berturut-turut, yaitu 1,41 V, 1,65 V, dan 1,83 V. Berbeda dengan konfigurasi lainnya, konfigurasi 40:20 hanya dapat mengukur medan magnet diatas 3gauss karena sensitivitasnya yang sangat kecil.

Pengaruh Jumlah Lilitan Kumparan Pick-Up

Pada gambar 6 telah terlihat grafik pengukuran menggunakan sensor, dimana pada grafik tersebut terlihat perbedaan karakteristik sensor antara pengukuran pada kutub utara magnet dan kutub selatan magnet. Sehingga untuk mengetahui lebih jelas pengaruh jumlah lilitan kumparan *pick-up* pada sensor grafik pengukuran dibagi menjadi dua bagian, yaitu grafik pengukuran kutub utara magnet dan grafik pengukuran kutub selatan magnet.

Pengukuran pada kutub utara magnet menghasilkan medan magnet yang bernilai positif. Pada sensor *fluxgate* dihasilkan pula respon perubahan tegangan yang bernilai positif yang dapat dilihat secara spesifik pada gambar 7.



Gambar 7. Daerah kerja positif sensor

dari gambar 7 tersebut terlihat kurva pengukuran cenderung semakin curam untuk setiap jumlah lilitan kumparan *pick-up* yang lebih banyak. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah lilitan kumparan *pick-up*, maka sensitivitas sensor semakin besar. Untuk mengetahui nilai sensitivitas digunakan persamaan polinomial orde dua seperti yang tercantum pada grafik pada gambar 4.8. Pada

persamaan polinomial orde dua tersebut koefisien x mewakili medan magnet B , dan koefisien y mewakili perubahan tegangan keluaran sensor ΔV . Karena koefisien B^2 sangat kecil dibandingkan koefisien B , maka pada daerah pengukuran medan magnet positif diperoleh sensitivitas masing-masing konfigurasi sensor, yaitu seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Sensitivitas sensor pada daerah kerja positif

No. Sampel	Konfigurasi lilitan	Sensitivitas Sensor (mV/G)
1	40:20	5,1
2	40:40	13,1
3	40:60	27,7

Dari tabel diatas diketahui bahwa jumlah lilitan kumparan *pick-up* berbanding lurus dengan nilai sensitivitas sensor. Satuan mV/G menyatakan bahwa perubahan tegangan sensor sejumlah nilai dari satuan tersebut untuk setiap 1 Gauss.

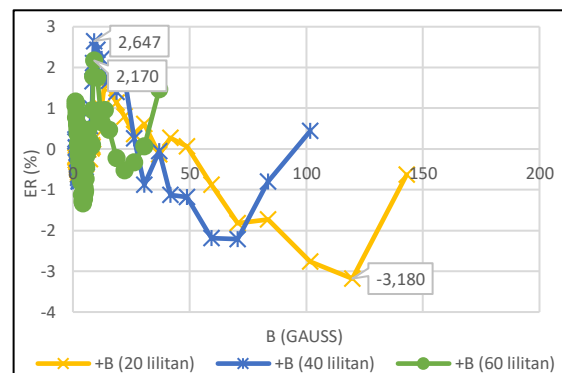
Koefisien determinasi R^2 pada pengukuran kutub utara magnet memiliki nilai dari 0,9818 hingga 0,9913, nilai ini menunjukkan bahwa sumbangan pengaruh medan magnet terhadap perubahan tegangan keluaran sensor adalah sebesar 98,18% hingga 99,13%. Sedangkan, 1,82% hingga 0,87% sisanya merupakan pengaruh variabel lain yang tidak dibahas pada penelitian ini. Sementara itu, Kesalahan relatif E_R pengukuran dihitung menggunakan rumus.

$$E_R = \frac{E_A}{V} \times 100\%$$

dimana V merupakan nilai rata-rata tegangan keluaran sensor dan E_A adalah kesalahan absolut yang dapat dihitung menggunakan rumus.

$$E_A = V - V'$$

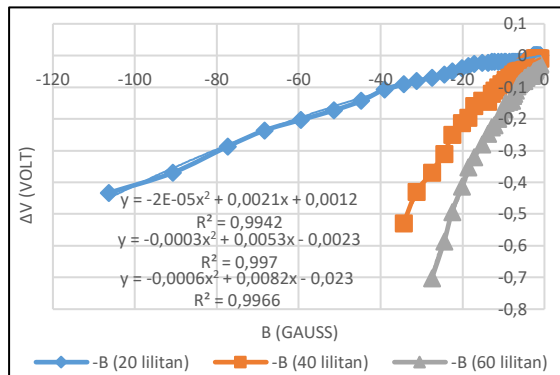
nilai V' merupakan nilai dari koefisien y pada pemodelan polinomial orde dua pada grafik pengukuran sensor. Sehingga diperoleh kesalahan relatif pengukuran medan magnet positif dengan sensor *fluxgate* ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Kesalahan relatif pada daerah kerja positif

untuk kesalahan relatif terbesar sensor *fluxgate* pada pengukuran kutub utara magnet pada konfigurasi 20 lilitan, 40 lilitan, dan 60 lilitan kumparan *pick-up* masing-masing adalah $\leq 3,18\%$, $\leq 2,65\%$, dan $\leq 2,17\%$.

Hasil pengukuran medan kutub selatan magnet menggunakan sensor *fluxgate* dengan menggunakan konfigurasi 40:20, 40:40, dan 40:60 dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. Daerah kerja negatif sensor

Pada gambar 9 terlihat bahwa hasil pengukuran medan magnet pada kutub selatan magnet menghasilkan respon perubahan tegangan yang bernilai negatif. Pengaruh jumlah lilitan kumparan *pick-up* sensor berbanding lurus dengan sensitivitas sensor. Karena pada ketiga grafik tersebut menunjukkan kurva yang semakin curam untuk setiap jumlah lilitan kumparan *pick-up* yang semakin banyak. Pada pengukuran medan magnet negatif diperoleh nilai sensitivitas dari setiap konfigurasi sensor yang dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Sensitivitas sensor pada daerah kerja negatif

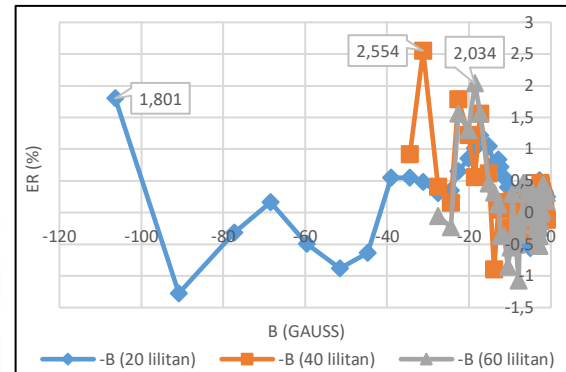
No. Sampel	Konfigurasi lilitan	Sensitivitas sensor (mV/G)
1	40:20	2,1
2	40:40	5,3
3	40:60	8,2

Tabel 3 menunjukkan bahwa jumlah lilitan kumparan *pick-up* berbanding lurus terhadap sensitivitas sensor khususnya pada pengukuran medan magnet negatif. Hasil perhitungan kesalahan pengukuran ditunjukkan pada gambar 10.

Koefisien determinasi R^2 pada pengukuran kutub selatan magnet memiliki nilai dari 0,9942 hingga 0,997, nilai ini menunjukkan bahwa sumbangan pengaruh medan magnet terhadap perubahan tegangan keluran sensor adalah sebesar 99,42% hingga 99,7%. Sedangkan, 0,58% hingga 0,3% sisanya merupakan pengaruh variabel lain yang tidak dibahas pada penelitian ini. Sama seperti

pengukuran medan magnet pada kutub utara, perhitungan kesalahan untuk pengukuran medan magnet pada kutub selatan juga menggunakan pendekatan persamaan polinomial orde dua. Sehingga diperoleh grafik seperti pada gambar 10.

Kesalahan relatif untuk pengukuran medan magnet negatif ditunjukkan pada gambar 10.



Gambar 10. Kesalahan relatif pada daerah kerja negatif

Kesalahan relatif konfigurasi sensor *fluxgate* untuk jumlah kumparan *pick-up* sebanyak 20 lilitan, 40 lilitan, dan 60 lilitan masing-masing adalah $\leq 1,80\%$, $\leq 2,55\%$, dan $\leq 2,03\%$.

Besarnya nilai kesalahan pada pengukuran ini disebabkan karena jumlah lilitan kumparan *pick-up* mempengaruhi sensitivitas sensor sehingga perubahan nilai tegangan pada sensor akan semakin besar untuk setiap 1 Gauss, sehingga semakin besar pula peluang untuk menghasilkan data yang menyimpang. Selain itu, dalam pengukuran ini masih belum menggunakan pengatur jarak yang presisi sehingga memungkinkan terjadinya perbedaan nilai medan magnet B saat pengukuran menggunakan sensor *fluxgate* dan saat diukur dengan *Magnetic Field Sensor Pasco CI-6520A* untuk setiap jarak pengukuran sehingga ada kemungkinan bahwa nilai respon tegangan yang diperoleh bukan merupakan respon dari nilai variabel medan magnet B . Pengukuran dengan cara mengonversi jarak menjadi medan magnet B ini dilakukan karena sensor *fluxgate* ini tidak dapat melakukan pengukuran secara bersamaan dengan alat ukur medan magnet lain, dikarenakan inti dari sensor *fluxgate* menghasilkan fluks magnetik yang digunakan sebagian medan magnet referensi sensor, dimana ketika dilakukan pengukuran medan magnet secara bersamaan dengan alat ukur lain, maka medan magnet dari sensor *fluxgate* akan mempengaruhi hasil pengukuran alat tersebut. Rangkaian pengolahan sinyal yang digunakan juga mempengaruhi kinerja sensor, dimana pada penelitian ini rangkaian pengolahan sinyal yang digunakan dibuat sesederhana

mungkin untuk mendukung kinerja sensor *fluxgate*. Pengaruh lain yang menyebabkan besarnya kesalahan pengukuran adalah adanya pengaruh dari medan magnet bumi

PENUTUP

Simpulan

Melalui pengujian sensor diperoleh karakteristik sensor *fluxgate* sebagai berikut: (1) Fungsi transfer dari ketiga sensor merupakan fungsi polinomial orde dua; (2) Daerah kerja terluas sensor *fluxgate* mampu mengukur medan magnet B dari -105 gauss hingga 140 gauss pada pengukuran dengan konfigurasi kumparan *pick-up* sebanyak 20 lilitan. Dari percobaan ini diperoleh data bahwa jumlah lilitan kumparan *pick-up* berbanding terbalik dengan luas daerah kerja sensor. (3) Sensitivitas rata-rata sensor terbesar diperoleh pada saat pengukuran dengan menggunakan konfigurasi kumparan *pick-up* sebanyak 60 lilitan dengan nilai sensitivitas 27,7 mV/G untuk pengukuran kutub utara magnet dan 8,2 mV/G untuk pengukuran kutub selatan magnet. Dari percobaan ini diperoleh data bahwa jumlah lilitan kumparan *pick-up* berbanding lurus dengan nilai sensitivitas sensor. (4) Pengukuran dengan menggunakan konfigurasi kumparan *pick-up* 20 lilitan memiliki data dengan nilai kesalahan relatif terbesar, yaitu 3,180%.

Saran

Diharapkan penelitian ini dapat dikembangkan dengan beberapa saran, yaitu: (1) menggunakan bahan inti sensor yang mampu meningkatkan sensitivitas sensor;

(2) memperbarui rangkaian pengolah sinyal *pick-up*, sehingga sensor menghasilkan daerah kerja yang simetris antara daerah kerja positif dan daerah kerja negatif dan semakin maksimal nilai sensitivitasnya; (3) melakukan variasi jarak dengan menggunakan alat bantu sehingga variasi jarak dan respon perubahan medan magnet bisa semakin presisi; (4) sensor *fluxgate* agar dibuat dengan ukuran yang lebih kecil agar lebih efisien dalam penggunaannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Djamil, M., Suyatno, Yulkifli, Setiadi, R. N. 2007. Sensor magnetik fluxgate karakteristik dan aplikasinya. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. Edisi khusus oktober 2007. pp.207-214
- Djamil, M. dan Setiadi, R. N. 2006. Pengukuran medan magnet lemah menggunakan sensor magnetik fluxgate dengan satu koil pick-up. *Prosiding ITB Sains & Teknologi*. Vol.38A, No.2, 2006. pp.99-115.
- Suyatno, Djamil, M., Yulkifli, dan Setiadi, R.N. 2008. Desain dan pengembangan fluxgate magnetometer dan beberapa aplikasinya. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. Vol.4, No.1, Januari, 2008
- Jiles, D., 1991. *Intruduction to Magnetism and Magnetic Materials*. First ed. London: Chapman & Hall